

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Guliš**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.

Student:

Ivan Guliš

Zagreb, 2012.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem svom mentoru Prof. dr. sc. Damiru Markučiću na prihvatanju mentorstva za ovaj rad, svim savjetima koje mi je davao kod izrade diplomskog rada.*

*Zahvaljujem Matiji Vavroušu i Nikoli Pavloviću koji su me vodili svojim znanjem tijekom izrade diplomskog rada u tvrtci Inetec d.o.o.*

*Zahvaljujem se tvrtci Inetec d.o.o. koja mi je omogućila potrebne materijale za izradu diplomskog rada.*

*Posebnu zahvalnost dajem svojoj obitelji koja mi je bila podrška kroz cijeli studij.*

*Ivan Guliš*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Guliš** Mat. br.: 0035154849

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **RADNE KARAKTERISTIKE ULTRAZVUČNIH SONDI**

Naslov rada na engleskom jeziku: **PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ULTRASONIC PROBES**

Opis zadatka:

Kako bi se osigurala ponovljivost rezultata te pouzdanost provedbe ultrazvučnog pogonskog ispitivanja reaktorske posude nuklearnih elektrana, potrebna je što veća ujednačenost radnih karakteristika istovrsnih ultrazvučnih sonda. U tu se svrhu prilikom proizvodnje ultrazvučnih sonda kontroliraju pojedini koraci proizvodnje te provjeravaju vrijednosti i odstupanja radnih karakteristika između više sonda kao i u odnosu na prihvatljive granice definirane standardima.

U radu je potrebno za odabranu grupu istovrsnih sonda (najmanje 3 sonde, 0°, longitudinalni val) provesti mjerenja i provjere sljedećih značajki sonde:

- karakteristične veličine ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni,
- karakteristične veličine frekvencijskog spektra ultrazvučnog impulsa,
- vremensko kašnjenje (*wedgedelay*) sonde,
- izlazna točka ultrazvučnog snopa sonde,
- kut ultrazvučnog snopa sonde,
- amplitude signala odziva s odabranih referentnih reflektora na različitim udaljenostima,
- prema mogućnosti odrediti ostale geometrijske parametre (profil) ultrazvučnog snopa sonde.

Utvrđene značajke odabranih sonda potrebno je međusobno usporediti kao i usporediti sa značajkama istovrsne sonde drugoga proizvođača. Rezultate odgovarajuće prikazati tablično i grafički.

U odnosu na zahtijevane kriterije prihvatljivosti donijeti zaključak o primjerenosti ispitanih sonda za korištenje u nerazornim ispitivanjima reaktorske posude nuklearnih elektrana.

Zadatak zadan:

26. travnja 2012.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

28. lipnja 2012.

Predviđeni datum obrane:

4., 5. i 6. srpnja 2012.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Čajner

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	2
POPIS TABLICA.....	3
SAŽETAK .....	4
1. UVOD .....	5
2. IZRADA ULTRAZVUČNE SONDE .....	6
3. ULTRAZVUČNA SONDA .....	7
4. KARAKTERIZACIJA .....	10
5. MJERENJE ULTRAZVUČNIH KARAKTERISTIKA SONDE .....	11
5.1. Mjerni sistem i njegovi elementi.....	11
5.2. Karakteristične veličine ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni .....	12
5.3. Karakteristične veličine frekvencijskog spektra ultrazvučnog impulsa .....	15
5.4. Vremensko kašnjenje ultrazvučne sonde („ <i>Wedge delay</i> “).....	18
5.5. Izlazna točka ultrazvučnog snopa UT sonde .....	20
5.6. Kut ultrazvučnog snopa UT sonde .....	24
5.7. Amplitude signala odziva s odabranih referentnih reflektora na različitim udaljenostima.....	30
6. ZAKLJUČAK.....	36
7. LITERATURA .....	37

## POPIS SLIKA

Slika 1. Komponente napravljene UT sonde – prikaz 1 .....	8
Slika 2. Komponente napravljene UT sonde – prikaz 2 .....	8
Slika 3. Ultrazvučne sonde za ispitivanje reaktorske posude .....	9
Slika 4. Shema spajanja za mjerenje ultrazvučnih veličina .....	11
Slika 5. Prikaz maksimalne amplitude odjeka signala za provrt $\Phi 3$ mm .....	12
Slika 6. Vremenska karakteristika .....	13
Slika 7. Vremenska karakteristika UT sonde 12 - 12 .....	14
Slika 8. Frekvencijska karakteristika UT sonde .....	15
Slika 9. Frekvencijska karakteristika i veličine od interesa .....	16
Slika 10. "Wedge delay" .....	18
Slika 11. Prikaz maksimalne vrijednosti amplitude odjeka signala .....	20
Slika 12. Prikaz izlazne točke UT sonde – orijentacija y .....	21
Slika 13. Prikaz izlazne točke UT sonde – orijentacija x .....	22
Slika 14. Orijentacija i prikaz izlazne točke UT sonde .....	22
Slika 15. Geometrijska aproksimacija ultrazvučnog snopa UT sonde [1] .....	24
Slika 16. Mjerenje kuta UT sonde .....	26
Slika 17. Prikaz kuta divergencije dobivenog mjerenjem .....	29
Slika 18. Prikaz mjerenja amplituda signala odziva .....	30
Slika 19. Prikaz amplituda odjeka signala .....	31
Slika 20. Prikaz parametara amplituda odjeka signala UT sonde 12 – 12 .....	32

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Serijski brojevi UT sonda .....	7
Tablica 2. Rezultati vremena trajanja impulsa za svaku pojedinu UT sondu .....	14
Tablica 3. Karakteristične veličine .....	17
Tablica 4. Vrijednosti "Wedge delay-a" za pojedinu UT sondu .....	19
Tablica 5. Rezultati mjerenja izlazne točke UT sonde .....	23
Tablica 6. Rezultati mjerenja za UT sondu 12 - 12 .....	27
Tablica 7. Rezultati mjerenja za UT sondu 13 - 12 .....	27
Tablica 8. Rezultati mjerenja za UT sondu 15 - 12 .....	28
Tablica 9. Rezultati mjerenja za UT sondu 16 - 12 .....	28
Tablica 10. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 12 – 12 na reflektorima zadanih dubina .....	32
Tablica 11. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 13 – 12 na reflektorima zadanih dubina .....	33
Tablica 12. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 15 – 12 na reflektorima zadanih dubina .....	33
Tablica 13. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 16 – 12 na reflektorima zadanih dubina .....	34
Tablica 14. Prikaz usporedbe pada amplituda sa porastom dubine reflektora.....	35

## SAŽETAK

Na početku rada su opisane osnovne informacije o samoj izradi ultrazvučnih sondi, njihove planirane karakteristike.

Sljedeće poglavlje govori u karakterizaciji, kako je zapravo i koliko ona bitna kod serijske proizvodnje ultrazvučnih sondi.

Na raspolaganju će biti grupa od četiri ultrazvučne sonde jednakoga tipa ( $0^\circ$ , longitudinalni val) te će se u radu provesti mjerenja i provjeriti sljedeće značajke UT sondi poput:

- karakteristične veličine ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni,
- karakteristične veličine frekvencijskog spektra ultrazvučnog impulsa,
- vremensko kašnjenje („*wedgedelay*“) sonde,
- izlazna točka ultrazvučnog snopa sonde,
- kut ultrazvučnog snopa sonde,
- amplitude signala odziva s odabranih referentnih reflektora na različitim udaljenostima.

Na temelju prikupljenih informacija će se donijeti zaključak o primjerenosti korištenja ultrazvučnih sondi u svrhu nerazornih ispitivanja reaktorske posude nuklearnih elektrana.



## 1. UVOD

Integritet materijala reaktorske posude je jedan od ključnih čimbenika pri osiguranju sigurnosti rada nuklearnih postrojenja. Da bi se moglo vršiti nadzor stanja materijala, potrebno je vršiti periodične kontrole materijala u sklopu pogonskih ispitivanja.

Prilikom nadzora materijala u svrhu osiguranja integriteta jedna od uobičajenih metoda je metoda ultrazvučne kontrole. Upotrebom ultrazvučne kontrole moguće je dobiti informacije o mogućem postajanju oštećenja materijala u volumenu materijala reaktorske posude.

Da bi se osigurala ponovljivost rezultata te pouzdanost provedbe ultrazvučnog pogonskog ispitivanja reaktorske posude nuklearnih elektrana, potrebna je što veća ujednačenost radnih karakteristika istovrsnih ultrazvučnih sondi. U tu se svrhu prilikom proizvodnje ultrazvučnih sondi kontroliraju pojedini koraci proizvodnje te provjeravaju vrijednosti i odstupanja radnih karakteristika između više sondi kao i u odnosu na prihvatljive granice definirane standardima.

## 2. IZRADA ULTRAZVUČNE SONDE

Izvori ultrazvuka koji se koriste u metodama nerazornih ispitivanja su sonde koje prislanjanjem na objekt ispitivanja prenose titranje u sredstvo s kojim su u dodiru.

Unutar sonde ugrađen je pretvarač koji ima piezoelektrična svojstva. Ukoliko se materijal piezoelektričkog svojstva izreže na odgovarajući način, najčešće u obliku tankih pločica, dobiva se tzv. aktivni materijal pretvarača koji može proizvoditi ultrazvuk ili registrirati prijem ultrazvuka.

Mehaničkim djelovanjem na piezoelektrični materijal, zbog deformacije karakteristične strukture, dolazi do takvog rasporeda među atomima da se na površini stvara napon. Obratno, narinuti napon uzrokuje promjenu debljine pločice pretvarača.

Ultrazvučni impulsi šire se na različite načine u različitim sredstvima. Upravo se ta činjenica koristi za otkrivanje pogrešaka u ispitivanom objektu. Ultrazvučni impulsi na granici sredstva kao i sve druge vrste valova slijede zakonitost valnog gibanja. Radi toga na granici sredstva, bilo da se radi o stijenci ispitnog objekta ili granici ispitni material – nepravilnost, dolazit će do refleksije ultrazvučnih valova i/ili loma, difrakcije odnosno ogiba ili druge vrste međudjelovanja sredstva i odaslane ultrazvučne energije.

Kako bi se pristupilo izradi ultrazvučne sonde, važno je definirati parametre ultrazvučne kontrole. Parametri ultrazvučne kontrole ovise o količini ultrazvučne energije kojom se provodi ispitivanje ali i o nizu drugih fizikalnih veličina koje definiraju opremu, tehniku rada i objekt ispitivanja.

Osnovni parametri koji utječu na izradu sonde su:

- brzina ultrazvuka u sredstvu
- kut nagiba ultrazvučnog pretvarača
- akustička impedancija sredstva
- atenuacija ultrazvuka kroz sredstvo
- frekvencija ultrazvuka
- dizajn sonde

### 3. ULTRAZVUČNA SONDA

Tvrtka *Inetec – Institut za nuklearnu tehnologiju d.o.o.* je izradila četiri UT sonde istog tipa sa sljedećim planiranim karakteristikama:

- nazivna frekvencija: 2.25 MHz
- kut izlaznog snopa  
u sredstvu ispitivanja: 0°
- dimenzije pretvarača: Ø25 mm
- dimenzije UT sonde: 40x40x30 mm
- vrsta vala u sredstvu: Longitudinalni

Karakteristike sonde odabrane su na temelju potreba za primjenu na automatiziranom ispitivanju reaktorske posude VVER reaktora. Na temelju fizikalnih karakteristika ultrazvuka, ispitnog materijala te prethodnog iskustva tijekom stvarnih ispitivanja su odabrane gore navedene karakteristike.

Izrađene ultrazvučne sonde sastoje se iz sljedećih komponenti, slika 2.:

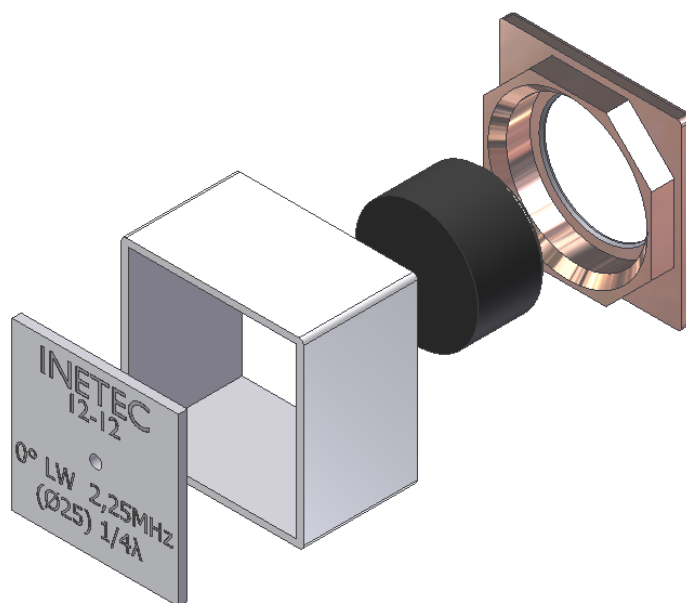
- 1) zaštitna 1/4 pločice<sup>1</sup>
- 2) piezo ultrazvučni pretvarač
- 3) kućište pretvarača
- 4) prigušno sredstvo
- 5) kućište sonde
- 6) poklopac sonde
- 7) kabel s microdot konektorom (duljina l = 2 m)

Donja tablica prikazuje serijske brojeve proizvedenih ultrazvučnih sonda.

**Tablica 1. Serijski brojevi UT sonda**

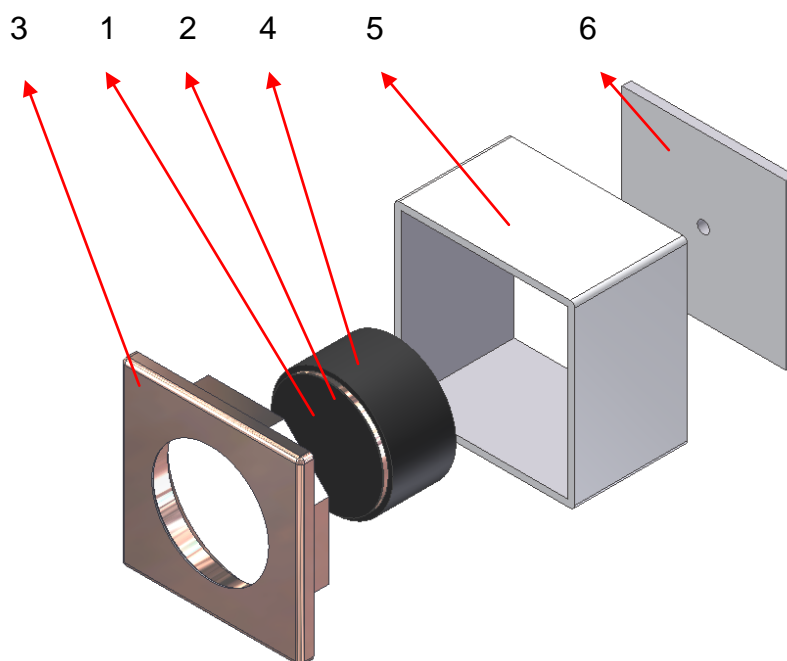
Redni broj sonde	Serijski broj sonde
1	12 – 12
2	13 – 12
3	15 – 12
4	16 – 12

<sup>1</sup> 1/4 predstavlja 1/4 valne duljine u materijalu zaštitne pločice



Slika 1. Komponente napravljene UT sonde – prikaz 1

ž



Slika 2. Komponente napravljene UT sonde – prikaz 2



**Slika 3. Ultrazvučne sonde za ispitivanje reaktorske posude**

Da bi se izrađena sonda mogla koristiti u svrhe za koje je namijenjena, potrebno je izvršiti niz mjerenja i provjere sljedećih značajki sonde.

## 4. KARAKTERIZACIJA

Karakterizacija ultrazvučnih sondi se može vršiti iz više razloga. Bez obzira na svrhu, prilikom svake karakterizacije se utvrđuje odstupanje nazivnih vrijednosti karakteristika sonde unutar granica tolerancije no ovisno o razlogu tj. namjeni karakterizacije, razlikuju se karakteristike koje se ocjenjuju i uspoređuju, te granice tolerancija.

Prilikom serijske proizvodnje sondi nužno je provesti karakterizaciju sondi da bi se ustvrdilo da li sonde jednakog tipa imaju približno jednake karakteristike. Pod približno jednakim karakteristikama se podrazumijeva da su određene karakteristike sonde sličnih vrijednosti tj. da su odstupanja određenih karakteristika različitih sondi jednakoga tipa unutar definiranih granica tolerancije.

Važnost približno jednakih karakteristika ultrazvučnih sondi je u tome što je na taj način omogućena ponovljivost mjerenja. U slučaju da su različite UT sonde jednakog tipa približno jednakih karakteristika, moguća je zamjena UT sonde tijekom ispitivanja uz uvjet da su ostale postavke smjernog sistema približno jednakih vrijednosti.

Postoje dvije vrste karakterizacija:

- Radna karakterizacija sustava, ta vrsta karakterizacije se provodi prije samog ispitivanja zbog provjere prikladnosti za ispitivanje i u tijeku ispitivanja u svrhu provjere karakteristika
- Karakterizacija od ovlaštenog laboratorija, ta vrsta karakterizacije se provodi od strane ovlaštene i opremljene institucije. Koristi se složena i vrlo skupa oprema, koju u principu nema svaki laboratorij ultrazvučne kontrole. Uz sve to postoji i visoka razina specijalističkog znanja koja je potrebna za potvrđivanje slijedivosti djelova sustava za ispitivanje.[1]

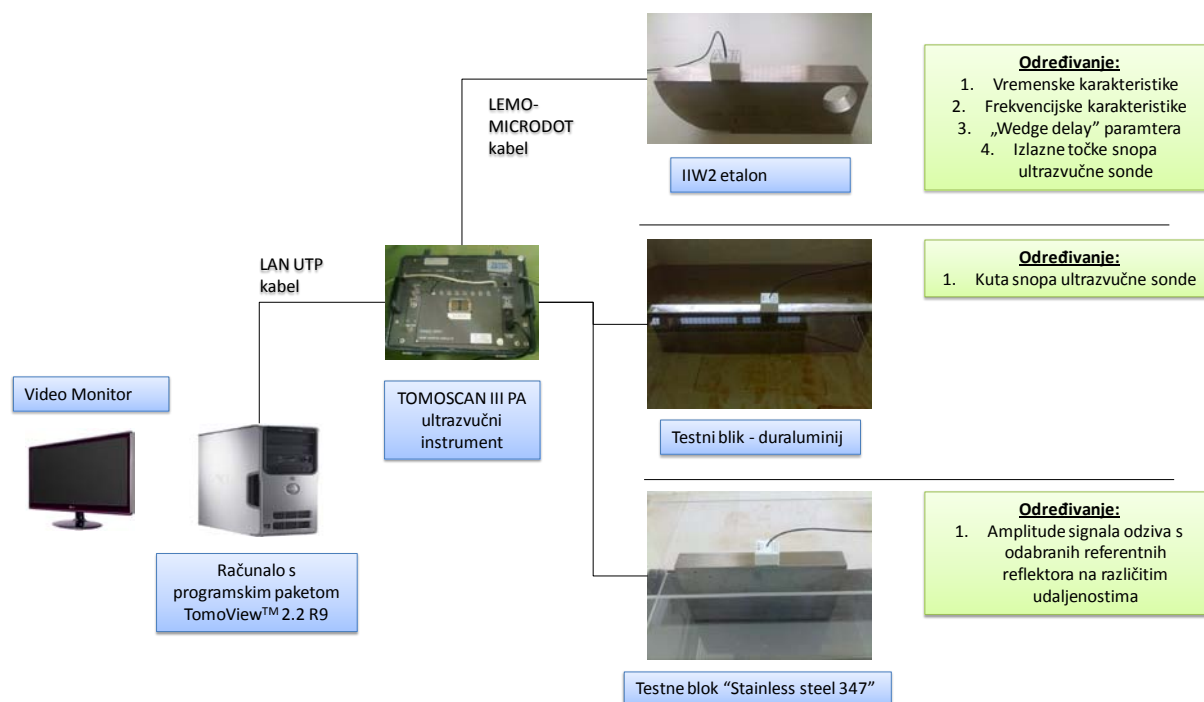
U nastavku rada će se prikazati karakterizacija ultrazvučne sonde da bi se utvrdilo da li je moguća ponovljivost mjerenja tijekom nerazornih ispitivanja ultrazvučnom metodom. U tu svrhu će biti uspoređen niz karakteristika ultrazvučnih sondi koje imaju utjecaj na rezultate ispitivanja ultrazvučnom ispitnom metodom.

Dio karakteristika koje će biti uspoređene su karakteristike koje se redovito provjeravaju tijekom radne karakterizacije no određene karakteristike i njihove usporedbe će biti prvenstveno laboratorijskog tipa.

## 5. MJERENJE ULTRAZVUČNIH KARAKTERISTIKA SONDE

### 5.1. Mjerni sistem i njegovi elementi

Mjerenje ultrazvučnih veličina je napravljeno prema danoj shemi 4. u laboratoriju tvrtke *Inetec – Institut za nuklearnu tehnologiju d.o.o.*



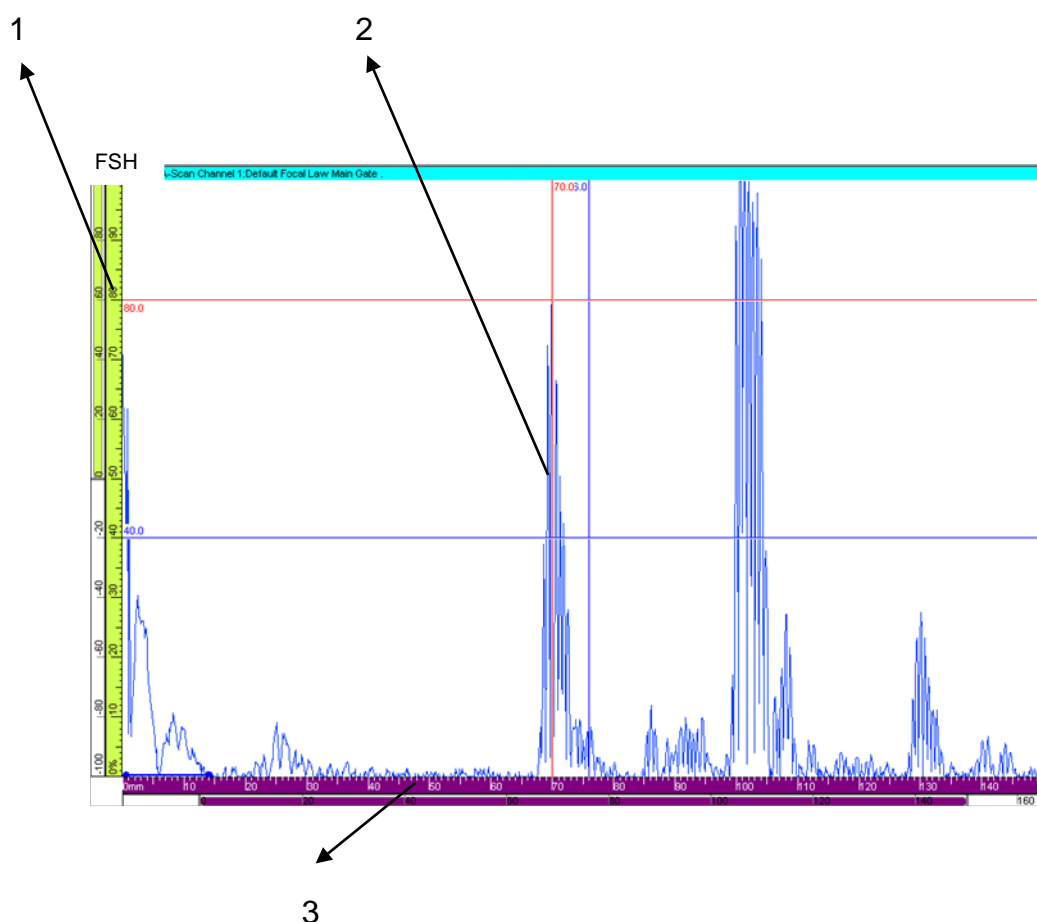
**Slika 4. Shema spajanja za mjerenje ultrazvučnih veličina**

Kod mjerenja su korišteni sljedeći elementi sustava:

- UT Instrument: Tomoscan III, Ser. No.: 36970-02
- osobno računalo s instaliranim softwareom: TomoView™ 2.2 R9
- referentni blok: IIW – Type 2, Ser.No.: 14926
- komplet kabela za povezivanje elemenata sustva
- ultrazvučne sonde navedene u tablici 1.
- testni blok – duraluminij, Ser.No.: DUR-AL-01
- testni blok – „stainless steel 347“ L.E.O. blok, Ser.No.: 001

## 5.2. Karakteristične veličine ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni

Mjerenje ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni se provelo na način da se ultrazvučna sonda postavi na referentni blok: IIW – Type 2 iznad bočnog provrta  $\Phi 3$  mm na dubini  $h = 70$  mm [3]. Za određivanje vremenske domene UT sonde, najpovoljnija je situacija kada se postigne maksimalna amplituda odjeka signala za taj provrt, slika 5.

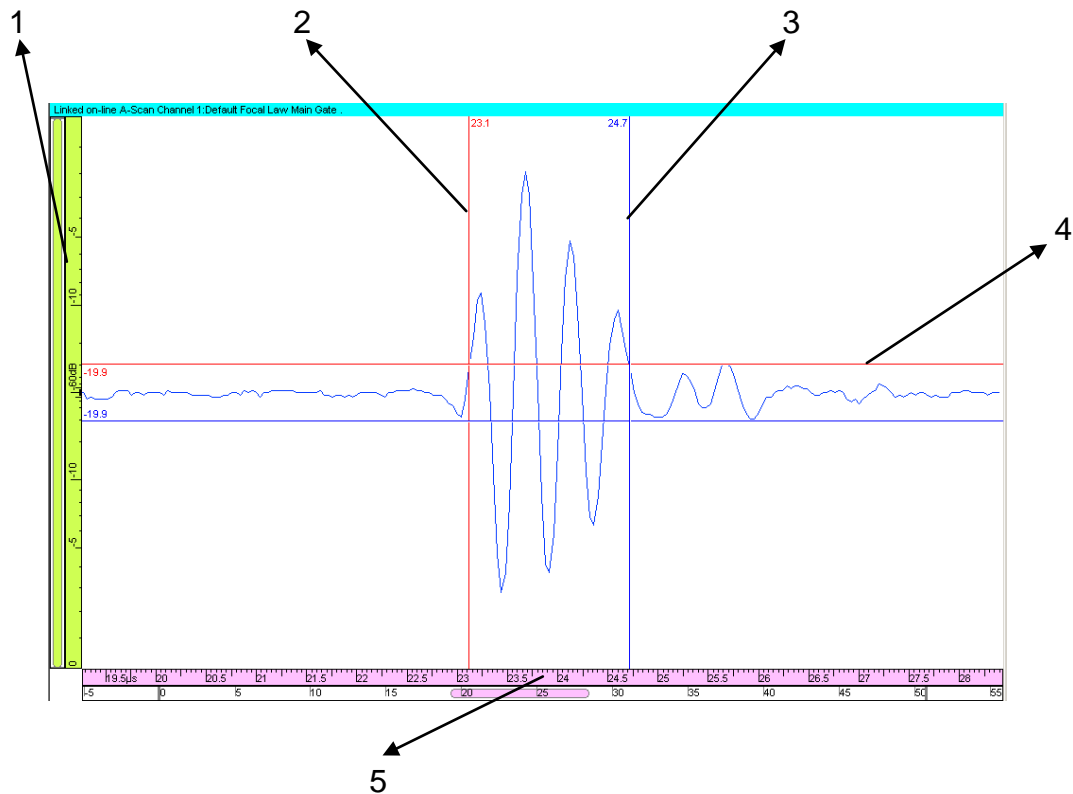


Slika 5. Prikaz maksimalne amplitude odjeka signala za provrt  $\Phi 3$  mm

- 1 – os koja označava amplitudu odjeka signala (80% FSH)
- 2 – prikaz odjeka signala za bočni provrt  $\Phi 3$  mm
- 3 – os na kojoj su označene dubine za ispitivani materijal [mm]



Mjerenje se nadalje provodi određujući točke na vremenskoj skali tako da se smanji amplituda odjeka signala bočnog provrta  $\Phi 3$  mm za  $20 \text{ dB}^2$  i tamo gdje siječe referentna linija prvi puta amplitudu odjeka signala na lijevoj strani je vrijeme početka trajanja impulsa  $t_1$  a desno gdje siječe je vrijeme završetka trajanja impulsa  $t_2$ , slika 6.



Slika 6. Vremenska karakteristika

- 1 – amplituda odjeka signala [dB]
- 2 – referentna linija koja predstavlja početak trajanja impulsa odjeka signala  $t_1$  [mm]
- 3 – referentna linija koja predstavlja završetak trajanja impulsa odjeka signala  $t_2$  [mm]
- 4 – referentna linija koja predstavlja pad amplitude od  $20 \text{ dB}$  [dB]
- 5 – os koja prikazuje vrijeme trajanja impulsa [ $\mu\text{s}$ ]

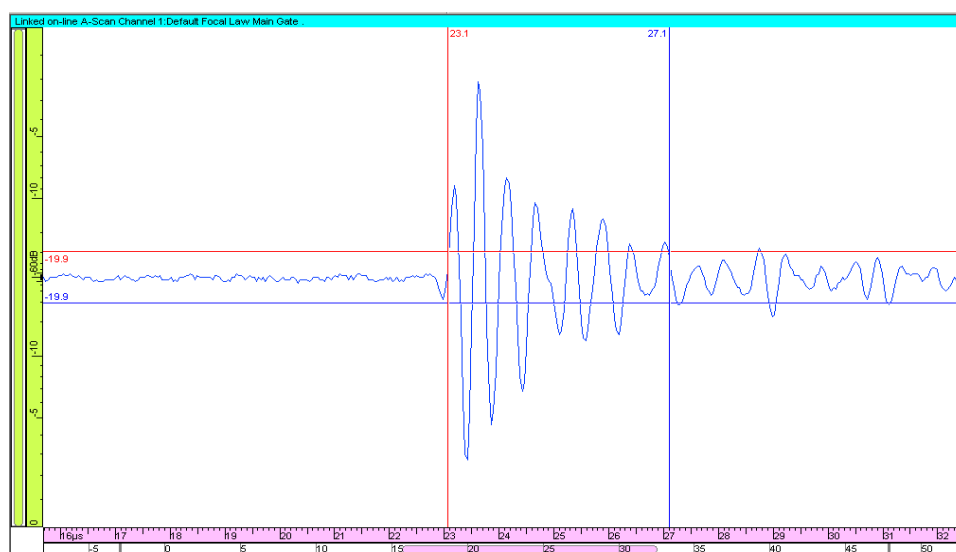
<sup>2</sup> Pad amplitude odjeka signala bočnog provrta na  $h/10$  visine amplitude [3]

U datoj tablici 2. su podaci koji su izmjereni na četiri UT sonde gdje treba naglasiti da su se mjerenja za svaku sondu ponavljala tri puta na taj način da se UT sonda po završetku svakog mjerenja odmaknula od referentnog bloka: IIW – Type 2 i za novo mjerenje ponovo postavilo na referentni blok: IIW – Type 2.

**Tablica 2. Rezultati vremena trajanja impulsa za svaku pojedinu UT sondu**

Ultrazvučna sonda	Vrijeme trajanja impulsa [ $\mu$ s]		
	$t_1$	$t_2$	$t_2 - t_1$
12 – 12	23,1	27,1	4
	23,1	27,2	4,1
	23,1	27,2	4,1
13 – 12	23,1	24,8	1,7
	23,1	24,8	1,7
	23,1	24,9	1,8
15 – 12	23,1	24,9	1,8
	23,1	24,8	1,7
	23,1	24,9	1,8
16 – 12	23,1	24,6	1,5
	23,1	24,7	1,6
	23,1	24,7	1,6

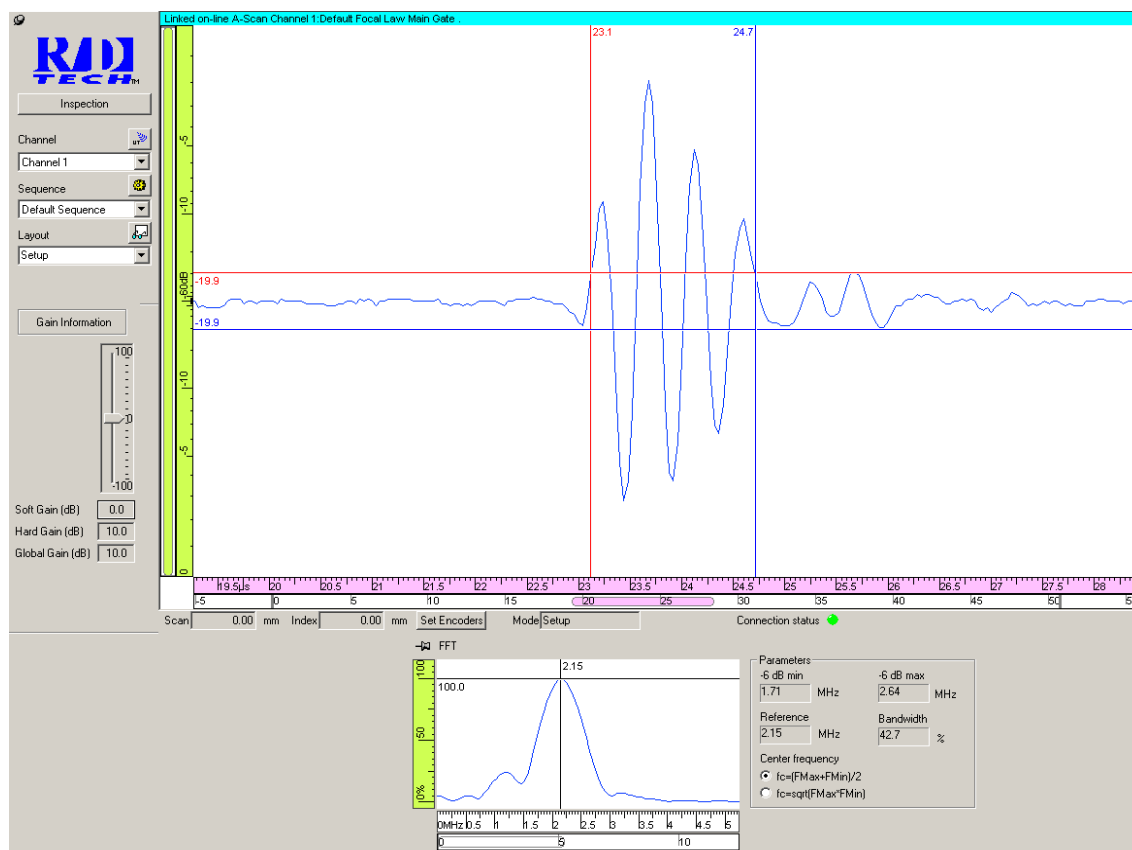
Na temelju vrijednosti dobivenih mjerenjem vidljivo je da nema znatnijih razlika u vremenu trajanja impulsa za sonde 13 – 12, 15 – 12 i 16 – 12. Nadalje se primjećuje da sonda 12 – 12 ima znatno dulje trajanje impulsa što je posljedica postupka proizvodnje UT sonde, slika 7.



**Slika 7. Vremenska karakteristika UT sonde 12 - 12**

### 5.3. Karakteristične veličine frekvencijskog spektra ultrazvučnog impulsa

Određivanjem vremenske domene UT sonde u poglavlju 5.2., softverski program TomoView™ 2.2 R9 sam izračunava frekvencijsku karakteristiku UT sonde, slika 8.



Slika 8. Frekvencijska karakteristika UT sonde

Veličine koje su od interesa prilikom određivanja frekvencijske karakteristike su:

- *Središnja frekvencija* ( ) – frekvencija pri kojoj ultrazvučni sustav postiže maksimalnu amplitudu titranja za određene uvjete. U datom slučaju je riječ o frekvenciji pri koj je postignuta najveća amplituda titranja odaziva sistema na reflektoru  $\Phi 3$  mm, bočnom provrtu na referentnom bloku: IIW – Type 2
- *Niža frekvencija* ( ) – granica niže frekvencije koja je ostavrena na -6dB padu srednje frekvencije
- *Viša frekvencija* ( ) – granica više frekvencije koja je ostavrena na -6dB padu srednje frekvencije

- Frekvencijski raspon „*Bandwidth*“ ( $B$ ) – određuje se preko iduće formule:

---

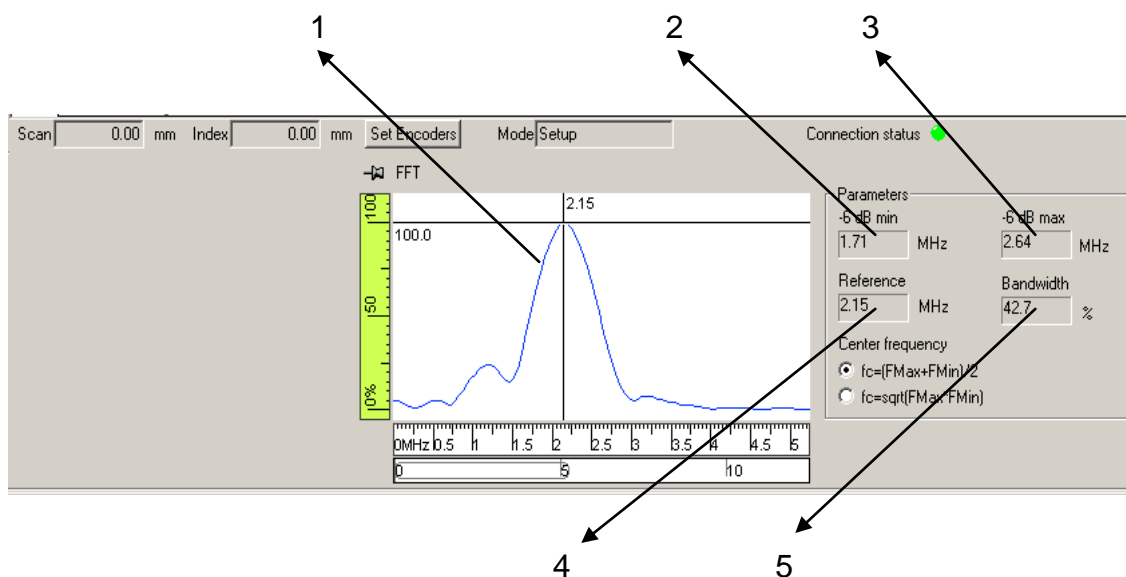
gdje su:

$B$  – Frekvencijski raspon „*Bandwidth*“

- granica niže frekvencije za -6 dB pad amplitude srednje frekvencije
- granica više frekvencije za -6 dB pad amplitude srednje frekvencije
- Središnja frekvencija „*Centar frequency*“

Središnja frekvencija se dobiva putem sljedećeg izraza:

---



**Slika 9. Frekvencijska karakteristika i veličine od interesa**

- 1 – Amplitudni odaziv u ovisnosti o frekvenciji
- 2 – Niža granična frekvencija ( ) [Hz]
- 3 – Viša granična frekvencija ( ) [Hz]
- 4 – Središnja frekvencija ( ) [Hz]
- 5 – Frekvencijski raspon „*Bandwidth*“ [%]

U tablici 3. su pokazane sve veličine frekvencijskog spektra koje su nam u ovom poglavlju bile od interesa.

**Tablica 3. Karakteristične veličine**

Ultrazvučna sonda	- 6 dB min [Hz]	- 6 dB max [Hz]	Središnja frekvencija [Hz]	Frekvencijski raspon [%]
12 – 12	1,61	2,00	1,81	21,6
	1,56	2,00	1,76	24,7
	1,56	1,95	1,76	22,2
13 – 12	1,81	2,69	2,25	39,1
	1,76	2,69	2,20	41,8
	1,76	2,59	2,15	38,2
15 – 12	1,76	2,64	2,20	40,0
	1,76	2,64	2,20	40,0
	1,76	2,59	2,15	38,2
16 – 12	1,76	2,69	2,20	41,8
	1,71	2,64	2,15	42,7
	1,71	2,69	2,20	44,4

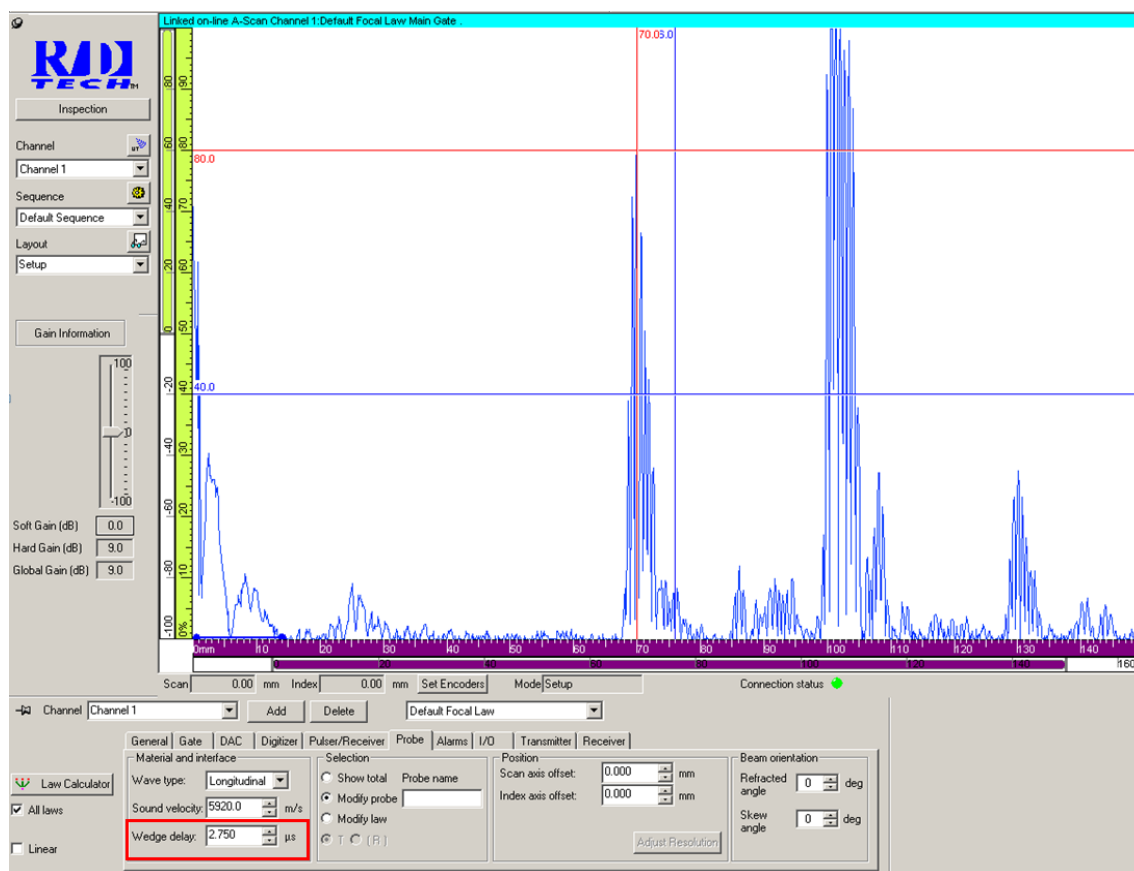
Na temelju izmjerenih vrijednosti za svaku pojedinu UT sondu vidljiva je ujednačenost izmjerene vrijednosti središnje frekvencije kod UT sonde 13 – 12, 15 – 12 i 16 – 12. Također je uočljivo i odstupanje prve UT sonde 12 – 12 u odnosu na ostale tri UT sonde. Kod UT sonde 12 – 12 izmjerena vrijednost središnje frekvencije je izvan granica tolerancije<sup>3</sup> obzirom na kriterij prihvatljivosti utvrđen normom. [3]

<sup>3</sup> Granice tolerancije  $\pm 10\%$  [3]

#### 5.4. Vremensko kašnjenje ultrazvučne sonde („Wedge delay“)

Vremensko kašnjenje ultrazvučne sonde možemo definirati kao vrijeme koje je potrebno od kreiranja longitudinalnog vala (UT val) do njegovog ulaska u sredstvo ispitivanja. „Wedge delay“ se definira i kao vrijeme potrebno da UT val prođe kroz zaštitnu pločicu, koja je napravljena od dvokomponentnog epoksida s akustičnom impedancijom.

„Wedge delay“ se određuje tako da se ultrazvučna sonda postavi na referentni blok: IIW – Type 2 na mjestu iznad bočnog provrta  $\Phi 3$  mm. Poznate veličine referentnog bloka: IIW – Type 2, napravljenog od čelika 1018: brzina longitudinalnog vala  $= 5920$  m/s [8], bočni provrt  $\Phi 3$  mm koji se nalazi na stvarnoj dubini  $h = 70$  mm [3]. Variranjem parametra koji predstavlja „Wedge delay“ se signal od provrta pomiče po osi koja predstavlja stvarnu dubinu u materijalu. Vrijednost „Wedge delay-a“ je zadovoljavajuća kada najveći odziv bočnog provrta bude na stvarnoj dubini tog istog provrta na referentnom bloku, slika 10.



Slika 10. „Wedge delay“

Tablica 4. Vrijednosti "Wedge delay-a" za pojedinu UT sondu

UT sonda	"Wedge delay" [ $\mu$ s]
12 – 12	2,900
13 – 12	2,700
15 – 12	2,750
16 – 12	2,750

S obzirom na rezultate mjerenja vidljiva je neznatna razlika između vrijednosti "Wedge delay-a" pojedinih UT sondi. Ukoliko bi se jedna sonda zamjenila drugom uz jednaku vrijednost "Wedge delay-a" ne bi došlo do značajnih promjena u očitavanju dubine reflektora.

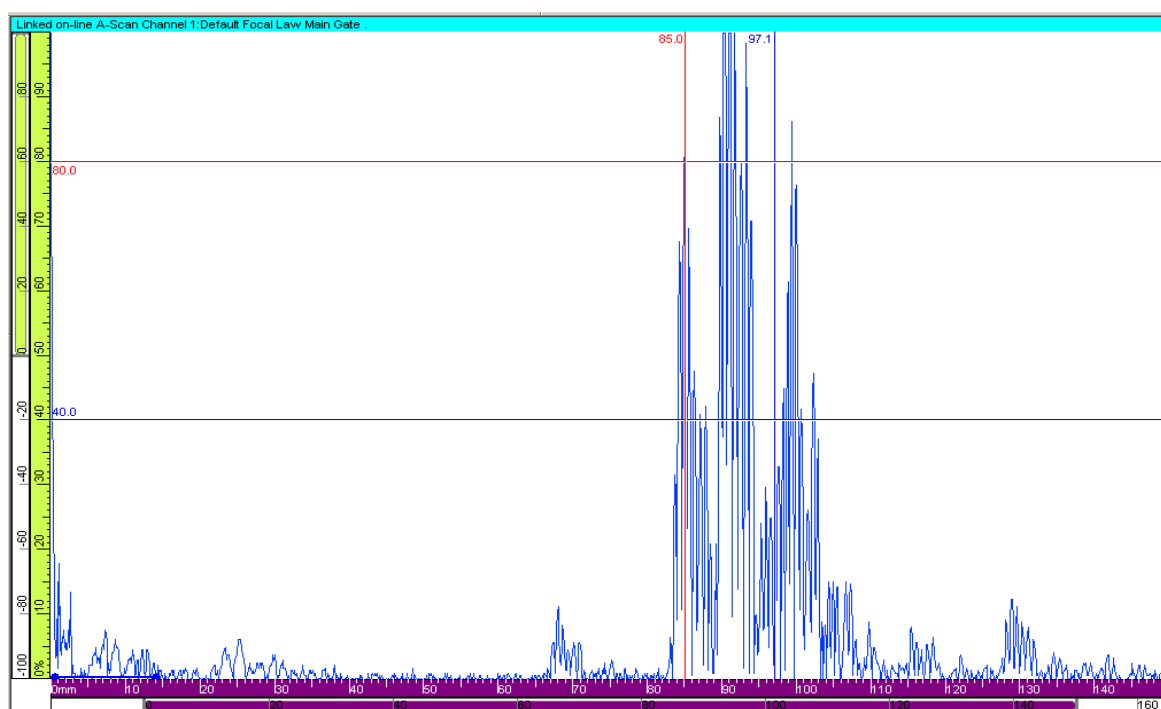
## 5.5. Izlazna točka ultrazvučnog snopa UT sonde

Izlazna točka UT sonde je ona točka na samoj ultrazvučnoj sondi iz koje središnja zraka ultrazvučnog snopa izlazi iz UT sonde. Izlazna točka ultrazvučne sonde se uzima kao ishodište mjerenja tijekom samog ispitivanja.

Kako je umetak od dvokomponentnog epoksida s akustičnim svojstvima podložen trošenju, izlazna točka ultrazvučne sonde se mora odrediti prije svakoga ispitivanja za svaku UT sondu posebno i provjeriti tijekom ispitivanja.

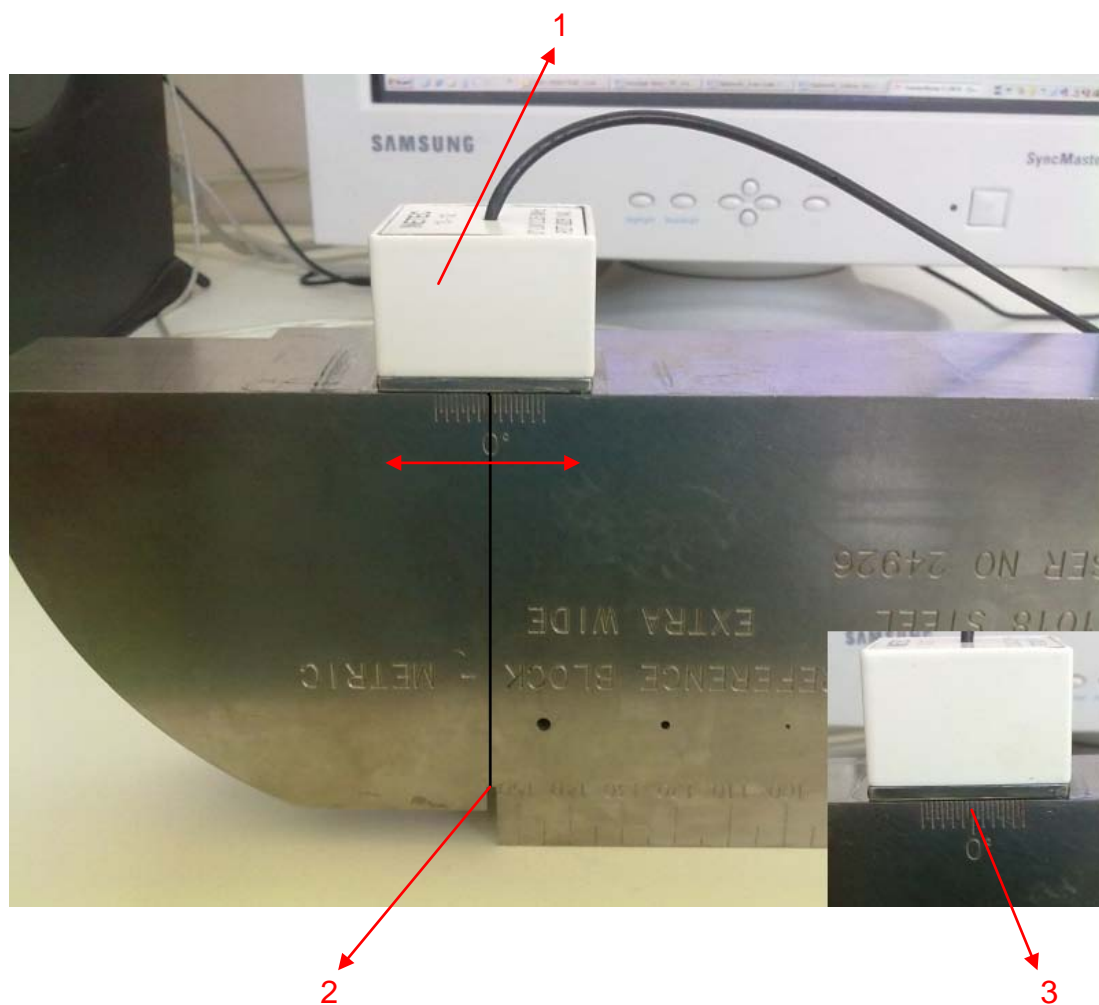
Za određivanje izlazne točke ultrazvučnog snopa potreban je referentni blok: IIW – Type 2 koji će omogućiti dobivanje signala odjeka.

Određivanje izlazne točke ravne ultrazvučne sonde se provodi na sljedeći način: UT sonda se postavi na ravnu površinu referentnog bloka: IIW – Type 2 iznad ureza koji je oznaka središta zakrivljenosti referentnog bloka: IIW – Type 2, pazеći pritom na paralelnost bočnih ploha UT sonde s bočnim plohama referentnog bloka, te na održavanje jednolikog pritiska UT sonde na kontaktnu plohu. Gornji brid utora (slika 12.) je na udaljenosti  $h = 85 \text{ mm}$  [3] od površine bloka i variranjem položaja oko točke „0“ kada se postigne maksimalna vrijednost amplitude signala zbog utora (slika 11.) može se ustvrditi da li je izlazna točka točno u središtu sonde ili postoji odstupanje.



Slika 11. Prikaz maksimalne vrijednosti amplitude odjeka signala





**Slika 12. Prikaz izlazne točke UT sonde – orijentacija y**

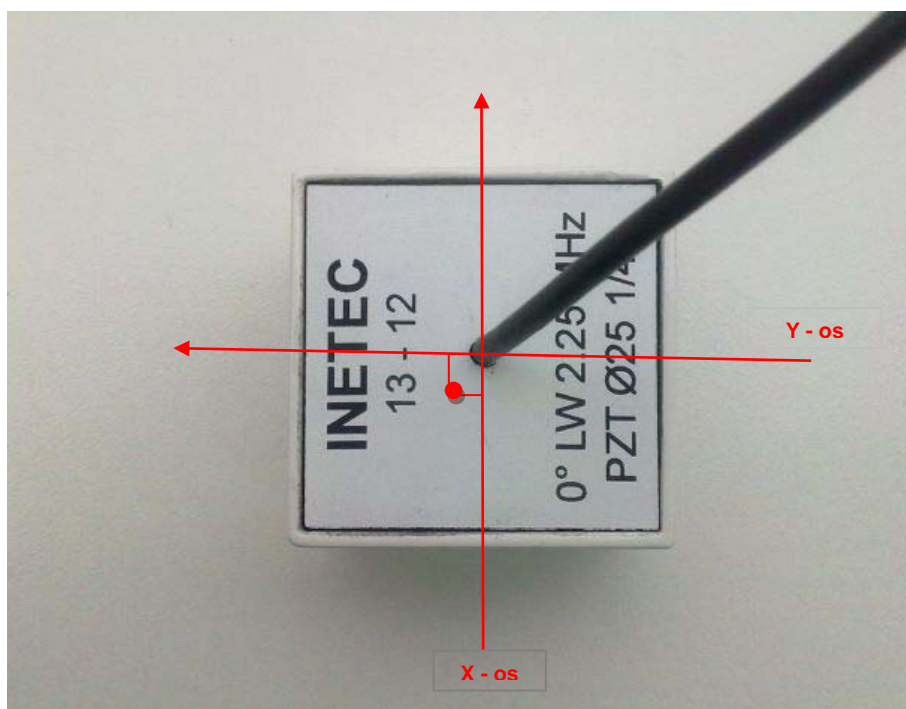
1 – UT sonda

2 – utor na referentnom bloku: IIW – Type 2

3 – oznaka središta zakrivljenosti referentnog bloka: IIW – Type 2



Slika 13. Prikaz izlazne točke UT sonde – orijentacija x



Slika 14. Orijentacija i prikaz izlazne točke UT sonde

Tablica 5. Rezultati mjerenja izlazne točke UT sonde

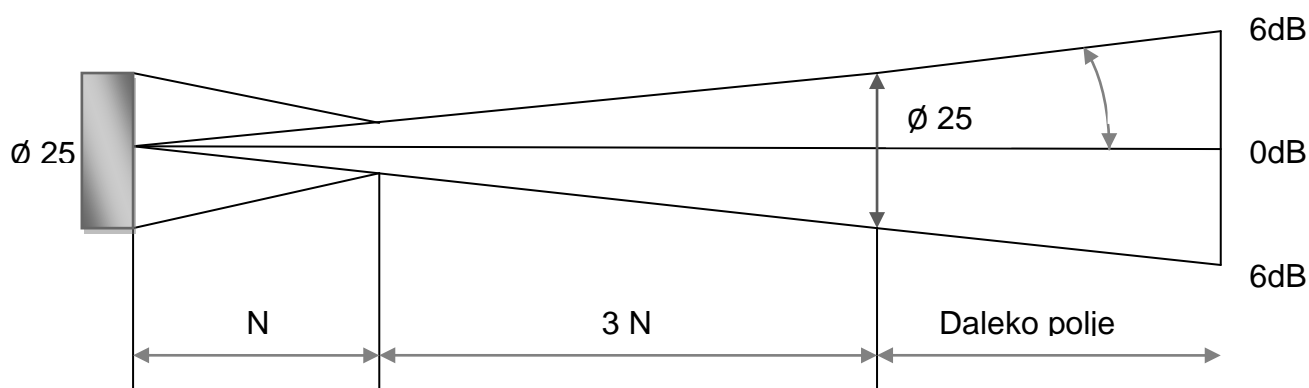
Ultrazvučna sonda	Odstupanje od središta UT sonde [mm]	
	Orientacija y	Orientacija x
12 – 12	1	1
	1	1
	1	1
13 – 12	0	0
	0	0
	0	0
15 – 12	0	-1
	0	-1
	0	-1
16 – 12	1	-1
	1	-1
	1	-1

Iz rezultata je vidljivo da je za pojedine UT sonde prisutan pomak izlazne točke sonde od centra same sonde. Najveće odstupanje bilo po y - osi ili x - osi je 1 mm i taj iznos se treba uzeti u obzir prilikom konfiguracije ultrazvučnog ispitnog sistema.

Vrijednosti pomaka izlazne točke trebaju biti unešeni tj. uračunati u položaj sonde na samome alatu tijekom stvarne inspekcije reaktorske posude pod parametrom „offsets“.

## 5.6. Kut ultrazvučnog snopa UT sonde

Na slici 15. je shematski prikazan presjek ultrazvučnog snopa ravne sonde.



Slika 15. Geometrijska aproksimacija ultrazvučnog snopa UT sonde [1]

Širina snopa unutar bliskog polja je približno jednaka širini pretvarača sonde, a smanjuje se do širine približno jednake polovini promjera pretvarača, za snop granica 20 dB, a samo četvrtinu promjera pretvarača za snop granica 6 dB.[1]

Pravilni oblik rasporeda intenziteta unutar ultrazvučnog snopa i jednolikost promjene intenziteta s udaljenošću bitno utječe na mogućnost korištenja ultrazvučnog snopa za otkrivanje i procjenu veličine pogrešaka tek u dalekom polju ultrazvučnog snopa.[1]

Na udaljenosti koja je veća od  $N$ , ultrazvučni snop se širi. Područje koje se nalazi unutar ultrazvučnog snopa, od  $N$  do  $3N$  se naziva *tranzitna zona*. [1]

Izraz za izračun duljine bliskog polja sljedi preko formule:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

gdje su:

$N$  – duljina bliskog polja UT sonde

– efektivni promjer pretvarača ( )

$D$  – stvarni promjer pretvarača

– izmjerena središnja frekvencija pretvarača

– brzina longitudinalnog vala

Izračunata vrijednost fokusne udaljenosti UT sonde:

---

Duljina bliskog polja N što je vidljivo i iz formule ovisi o veličini i vrsti pretvarača, te o vrsti ultrazvučnih valova. Unutar iste sonde se može mijenjati promjenom ostvarenog dodira sonde i kontaktne plohe.[1]

Kut divergencije se računa po izrazu:

---

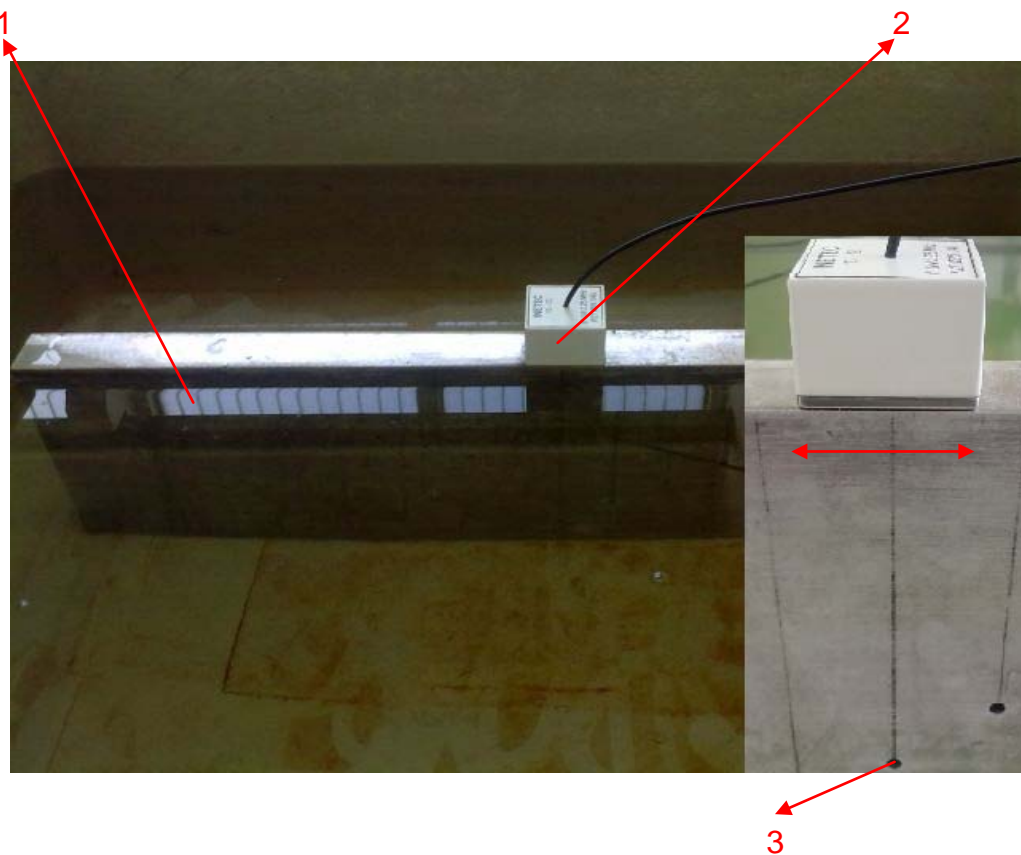
gdje su:

- kut divergencije za granicu polja 6 dB [°]
- brzina ultrazvuka
- D – nazivni promjer UT sonde
- izračunata središnja frekvencija pretvarača

Izračunata vrijednost kuta divergencije :

---

Mjerenje ultrazvučnog snopa UT sonde se radi na način da se UT sonda postavi na referentni blok napravljen od duraluminija poznate brzine [6] i izmjerenih dimenzija dubina bočnih provrta  $\Phi 5$  mm. UT sonda se postavi iznad bočnog provrta  $\Phi 5$  mm na prvoj sljedećoj dubini koja je izvan bliskog polja  $N$  tako da se dobije maksimalna amplituda odjeka signala tog provrta. Na mjestu maksimalnog odjeka amplitude signala postavlja se referentna linija na  $(80\% \text{ FSH})^4$  vidnog polja prikaza u softverskom programu *TomoView<sup>TM</sup> 2.2 R9*. Nakon toga se UT sonda pomiče u lijevu stranu dok amplituda signala ne padne na referentnu liniju koja se nalazi na  $(40\% \text{ FSH})$  što predstavlja pad od  $-6\text{dB}$  amplitude odjeka signala odnosno  $50\%$  - tni pad. Isti postupak slijedi za desnu stranu, slika 16.



Slika 16. Mjerenje kuta UT sonde

- 1 – testni blok napravljen od duraluminija
- 2 – UT sonda
- 3 – bočni provrt  $\Phi 3$  mm

<sup>4</sup> dogovorena i opće prihvaćena vrijednost

U tablicama 6, 7, 8, i 9. biti će prikazani rezultati mjerenja na testnom bloku za reflektore na određenim dubinama.

**Tablica 6. Rezultati mjerenja za UT sondu 12 - 12**

Dubina $h$ [mm]	UT sonda 12 – 12			
	Y – Pomak		X - Pomak	
	lijevo	desno	lijevo	desno
<b>66,5</b>	24	26	26	24
<b>91,5</b>	25	27	27	25
<b>116,5</b>	26	28	28	26
<b>141,5</b>	28	30	30	28
<b>166,5</b>	30	32	32	30
<b>191,5</b>	32	34	34	32

**Tablica 7. Rezultati mjerenja za UT sondu 13 - 12**

Dubina $h$ [mm]	UT sonda 13 – 12			
	Y – Pomak		X - Pomak	
	lijevo	desno	lijevo	desno
<b>66,5</b>	25	25	25	25
<b>91,5</b>	26	26	26	26
<b>116,5</b>	27	27	27	27
<b>141,5</b>	28	28	28	28
<b>166,5</b>	29	29	29	29
<b>191,5</b>	30	30	30	30

Tablica 8. Rezultati mjerenja za UT sondu 15 - 12

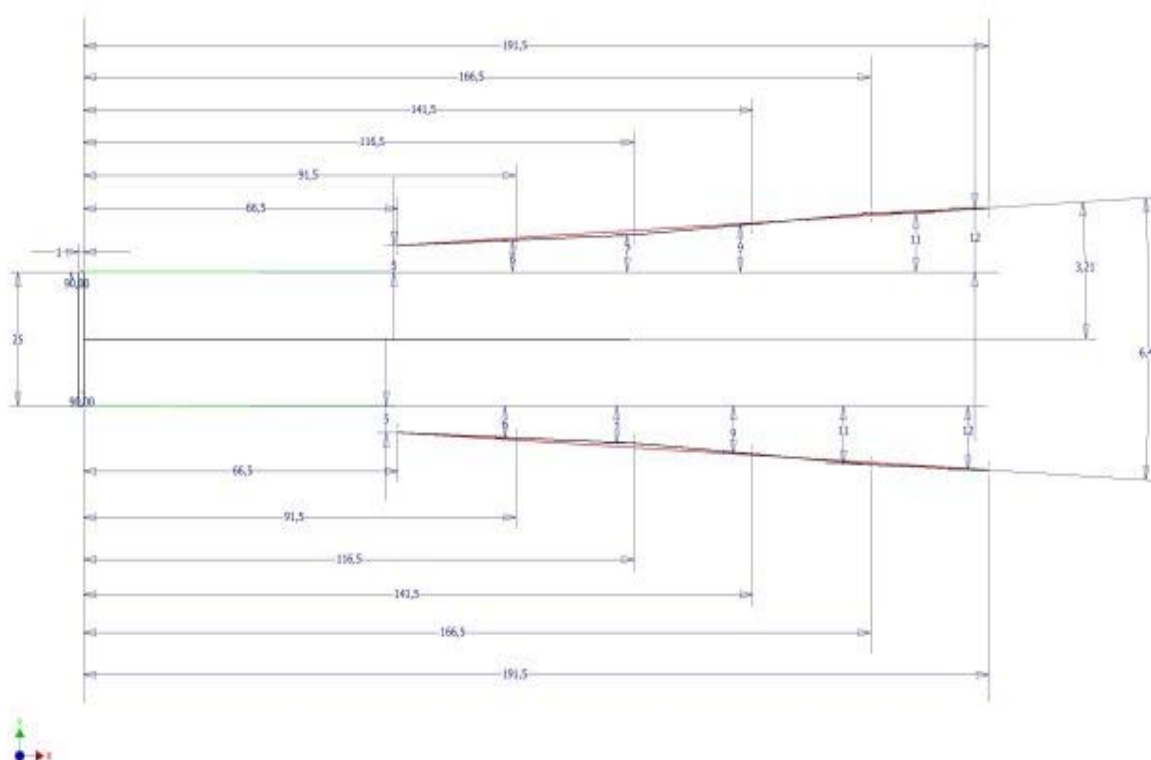
Dubina $h$ [mm]	UT sonda 15 – 12			
	Y – Pomak		X - Pomak	
	lijevo	desno	lijevo	desno
66,5	25	25	25	27
91,5	26	26	26	28
116,5	27	27	27	29
141,5	28	28	28	30
166,5	29	29	30	32
191,5	30	30	32	34

Tablica 9. Rezultati mjerenja za UT sondu 16 - 12

Dubina $h$ [mm]	UT sonda 16 – 12			
	Y – Pomak		X – Pomak	
	lijevo	desno	lijevo	desno
66,5	26	24	24	26
91,5	27	25	25	27
116,5	28	26	26	28
141,5	29	27	27	29
166,5	30	28	28	30
191,5	32	30	30	32

Odstupanja u samim mjerenjima su vršena u odnosu na središte UT sonde za orijentacije u smjeru  $y$  – osi i  $x$  – osi. Zbog toga pojedine sonde koje imaju pomaknutu izlaznu točku nemaju jednak pomak i lijevo i desno u istoj orijentaciji.





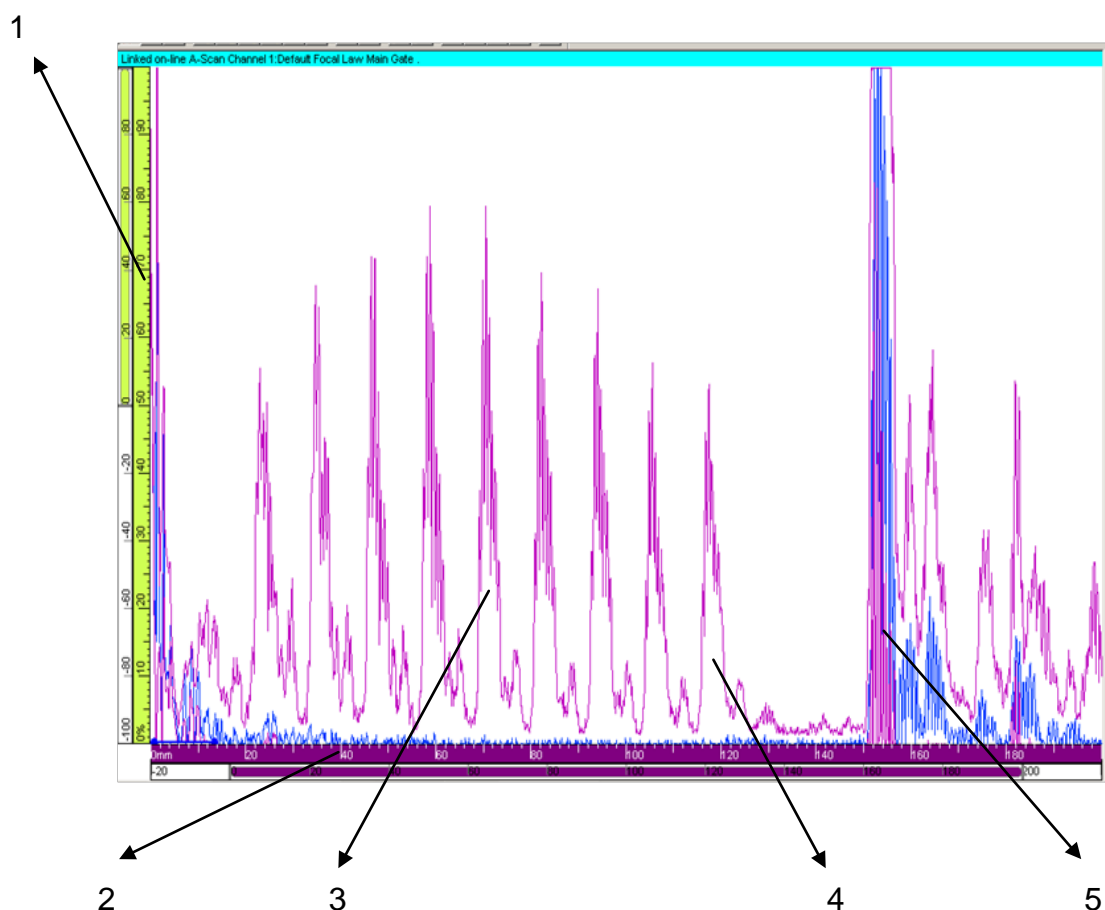
Slika 17. Prikaz kuta divergencije dobivenog mjerenjem

## 5.7. Amplitude signala odziva s odabраниh referentnih reflektora na različitim udaljenostima

Amplitude signala odziva s odabраниh reflektora na različitim udaljenostima se određuju na testnom bloku – „stainless steel 347“. Testni blok je napravljen od nehrđajućeg čelika kod kojeg je poznata brzina longitudinalnog vala  $= 5790 \text{ m/s}$  [7] i izmjerene dubine bočnih provrta  $\Phi 3 \text{ mm}$ . UT sonda se postavi iznad bočnog provrta (reflektora) koji je na prvoj sljedećoj dubini izvan duljine bliskog polja UT sonde, slika 18. Sonda se postavi tako da se dobije maksimalna amplituda odjeka signala za svaki reflektor na određenoj dubini. Povećanjem dubine reflektora dolazi do smanjenja mjerene amplitude odjeka signala i porasta razine povećanja signala kako bi se postigla maksimalna amplituda odjeka signala (80% FSH), slika 19.



Slika 18. Prikaz mjerenja amplitude signala odziva



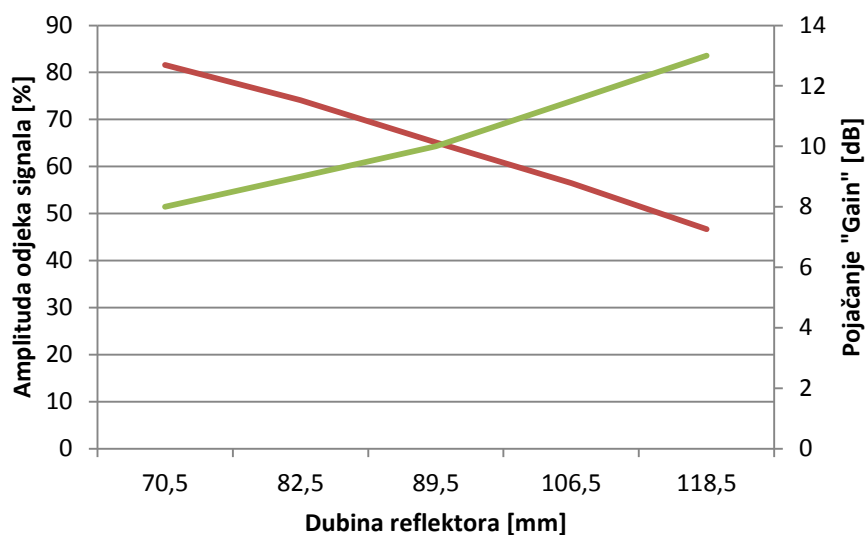
Slika 19. Prikaz amplituda odjeka signala

- 1 – os koja predstavlja amplitudu odjeka signala [%]
- 2 – os koja predstavlja stvarnu dubinu na materijalu ispitivanja [mm]
- 3 – maksimalna amplituda odjeka signala reflektora na dubini  $h = 70,5$  mm
- 4 – minimalna amplituda odjeka signala reflektora na dubini  $h = 118,5$  mm
- 5 – amplituda odjeka od stražnje plohe testnog bloka

U tablicama 10, 11, 12 i 13. će biti prikazani rezultati dobiveni mjerenjem reflektora na definiranim dubinama.

**Tablica 10. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 12 – 12 na reflektorima zadanih dubina**

UT sonda 12 – 12			
Dubina $h$ [mm]	Amplituda [%]	„Gain“ [dB]	Pojačanje 80% A „Gain“ [dB]
70,5	81,6	8	8
82,5	74,1	8	9
89,5	65,1	8	10
106,5	56,5	8	11
118,5	46,7	8	13



**Slika 20. Prikaz parametara amplituda odjeka signala UT sonde 12 – 12**

Tablica 11. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 13 – 12 na reflektorima zadanih dubina

UT sonda 13 – 12			
Dubina $h$ [mm]	Amplituda [%]	„Gain“ [dB]	Pojačanje 80% A „Gain“ [dB]
70,5	81,2	9	9
82,5	76,1	9	9,5
89,5	67,8	9	10,5
106,5	60	9	11,5
118,5	49,4	9	13

Tablica 12. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 15 – 12 na reflektorima zadanih dubina

UT sonda 13 – 12			
Dubina $h$ [mm]	Amplituda [%]	„Gain“ [dB]	Pojačanje 80% A „Gain“ [dB]
70,5	80	10	10
82,5	76,1	10	10,5
89,5	65,1	10	11,5
106,5	62	10	12
118,5	51	10	13,5

Tablica 13. Rezultati amplituda odjeka signala UT sonde 16 – 12 na reflektorima zadanih dubina

UT sonda 13 – 12			
Dubina $h$ [mm]	Amplituda [%]	„Gain“ [dB]	Pojačanje 80% A „Gain“ [dB]
<b>70,5</b>	80	9,5	9,5
<b>82,5</b>	72,5	9,5	10,5
<b>89,5</b>	69,4	9,5	11
<b>106,5</b>	58,4	9,5	12,5
<b>118,5</b>	49	9,5	13,5

Nakon provedenih mjerenja se vidi da dolazi sa porastom dubine reflektora do pada amplitude odjeka signala kod početnog pojačanja kojeg smo definirali s prvom dubinom na kojoj se nalazi reflektor.

Kako se amplituda odjeka signala smanjuje tako istovremeno raste pojačanje potrebno bi se dobilo ponovo maksimalno pojačanje koje se definiralo referentnom linijom na (80% FSH), tablica 14.

Tablica 14. Prikaz usporedbe pada amplituda sa porastom dubine reflektora

Dubina $h$ [mm]	UT Sonde – Amplitude odjeka [%]			
	12 – 12	13 – 12	15 – 12	16 – 12
<b>70,5</b>	81,6	81,2	80	80
<b>82,5</b>	74,1	76,1	76,1	72,5
<b>89,5</b>	65,1	67,8	65,1	69,4
<b>106,5</b>	56,5	60	62	58,4
<b>118,5</b>	49,4	46,7	13,5	49

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je na temelju prikupljenih informacija kroz mjerenja u odnosu na zahtjevane kriterije prihvatljivosti pokazati da li su UT sonde primjerene za narazorna ispitivanja reaktorske posude nuklearnih elektrana.

Kako bi se ocijenila prihvatljivost UT sondi u svrhu ispitivanja reaktorske posude provedena su mjerenja sljedećih značajki UT sondi:

- karakteristične veličine ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni,
- karakteristične veličine frekvencijskog spektra ultrazvučnog impulsa,
- vremensko kašnjenje („*wedgedelay*“) sonde,
- izlazna točka ultrazvučnog snopa sonde,
- kut ultrazvučnog snopa sonde,
- amplituda signala odziva s odabраних referentnih reflektora na različitim udaljenostima.

Kod mjerenja vremenske i frekvencijske karakteristike iz dobivenih rezultata se vidjelo da samo prva UT sonda ne zadovoljava kriterije prihvatljivosti, a razlog tomu je bio što je to bila prva UT sonda u procesu proizvodnje, te se na istoj optimizirao proces proizvodnje. Ne zadovoljavanje kriterija prihvatljivosti istu UT sondu čini ne primjerenom za ispitivanje reaktorske posude, za razliku od ostale tri ispitivane UT sonde.

Na temelju prikupljenih rezultata za zaključiti je da u određenoj mjeri postoji sličnost između ispitanih UT sondi koja bi svakako uz preciznija mjerenja tijekom proizvodnje mogla rezultirati precizniju ili veću ponovljivost zahtjevanih kriterija prihvatljivosti prema normi.[3] U tu svrhu bilo bi poželjno koristiti metodu mjerenja s većom preciznošću i visokom rezolucijom. Isto mjerenje moguće je izvesti uređajem „*Hydrphone*“ [9] tvrtke Precision Acoustics koji radi mjerenja s visokom preciznošću i automatiziranim modom rada čime bi se mogao, u određenoj mjeri, smanjiti faktor ljudske pogreške, te bi time povećali faktor kvalitete u procesu proizvodnje UT sondi.



## 7. LITERATURA

- [1] Vjera Krstelj, „Ultrazvučna kontrola“, Zagreb 2003.
- [2] Charles J.Hellier, „Handbook of nondestructive evaluation“, The McGraw-Hill Companies 2001.
- [3] BS EN 12668-2-2001, Characterization and verification of ultrasonic examination equipment
- [4] <http://www.ondacorp.com/images/Solids.pdf>
- [5] GEIT 20117E Nultrasonic transducer catalog.pdf
- [6] ISP-UT-32-E Procedure for Qualification of Ultrasonic System, Inetec, Zagreb 2004.
- [7] ISP-UT-04-E Procedure for Ultasonic Examination of Loovisa VVER 440 Reactor Pressure Vessel, Inetec, Zagreb 2002.
- [8] PHTOOL, calibaration standard IIW-2 Ser.No.: 14926 Desige certificate, PHTOOL, Telford PA 18969 USA, 2004.
- [9] <http://www.acoustics.co.uk/products/faq-hydrophone>